

数値解析による橋梁桁断面のフラッター特性の検討

長崎大学工学部 学生員 中宮義貴

長崎大学工学部 正会員 河村進一

1. 本研究の背景と目的

近年の構造物は建設技術の発達により、より大きく、高く、長く、そして軽くなっている。それは、構造物の可撓性が増してきていることを意味しており、構造物の耐風安定性への検討が重要となっている。耐風安定性を検討する際には、その構造物が風によってどのような力を受け、どのような応答を示すかを知ることが必要になる。風による構造物の挙動は、静的と動的、さらに静的変形、静的不安定、限定振動、動的不安定等に分類される。中でも動的不安定現象であるフラッターは、ある風速以上になると、大きな振幅のねじれ振動を伴い、発散的に振動するために最も危険とされる。通常、風応答を解析する方法としては、対象とする構造物のモデルを作製し、風洞実験によって測定するのが一般的である。しかし、風洞実験設備は高価かつ大型なため、何処にでも設置できるというものではなく、誰にでも利用できるというものでもない。本研究では数値流体解析を利用することにより、風洞実験を必要としない応答解析を試みる。

2. フラッター解析方法

図-1に示すように、一様な流れの中で曲げとねじれの2自由度支持された橋桁断面に相当する剛体模型を考える。このとき運動方程式は

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + S\ddot{\phi} + C_y\dot{y} + K_y y &= L \\ S\ddot{y} + I\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} + K_\phi \phi &= M \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで、 y :曲げ変位、 ϕ :ねじれ変位、 m :単位長さ当たり質量、 S :1次モーメント、 I :極慣性モーメント、 C_y, C_ϕ :構造減衰、 K_y, K_ϕ :ばね剛性、 L :揚力、 M :空力モーメントである。

後述の非定常空気を運動方程式に代入し、複素固有値解析することによって、複素固有値 $\omega = \omega_R + i\omega_I$ を得る。風速 U_j および減衰率 δ_j は、

$$U_j = \frac{b\sqrt{\omega_{jR}^2 + \omega_{jI}^2}}{k}, \quad \delta_j = \frac{\omega_{jR}}{\sqrt{\omega_{jR}^2 + \omega_{jI}^2}} \quad (2)$$

として得られる。換算振動数 k を変化させて、複素固有値解析を繰り返すことにより、風速-減衰率曲線が得られる。この図から減衰が正から負に転じる風速がフラッターの限界風速を与えることになる。

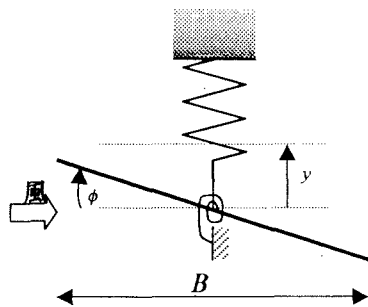


図-1 解析モデル

3. 非定常空気の算出

①平板空気の理論値

平板翼の非定常空気の理論値は、セオドルセンの平板空気を適用すると、揚力とモーメントは次式で表される。

$$\begin{aligned} L &= \pi \rho^2 \left(\ddot{y} + U\dot{\phi} - ba\ddot{\phi} \right) + 2\pi \rho b C(k) \left[\dot{y} + U\phi + b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\phi} \right] \\ M &= \pi \rho^3 \left[a\ddot{y} - U \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\phi} - b \left(\frac{1}{8} + a^2 \right) \ddot{\phi} \right] + 2\pi \rho b^2 \left(a + \frac{1}{2} \right) C(k) \left[\dot{y} + U\phi + b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\phi} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ :空気の質量密度、 b :断面の半幅員(= $B/2$)、 U :風速、 $C(k)$:セオドルセン関数である。

②数値流体解析による空気力の算出

風洞実験で非定常空気力を算出する場合、揚力とモーメントはそれぞれ次のように表される。

$$L = \pi \rho U^2 \left(L_y \frac{y}{B} + L_\phi \phi \right), \quad M = \pi \rho U^2 \left(M_y \frac{y}{B} + M_\phi \phi \right) \quad (4)$$

この式における L_y , L_ϕ , M_y , M_ϕ は、たわみおよびねじれ振動によって誘起される変動揚力と変動空力モーメントに相当する非定常空気力係数であり、複素数で表現される。本研究では、これらの非定常空気力係数を差分法による数値流体解析によって算出する。本来、たわみ、ねじれ 2 自由度でばね支持された下で行われるが、本研究では、たわみ、ねじれそれぞれ 1 自由度の強制加振実験を数値流体解析で行い、それぞれの非定常空気力係数を算出する。

解析領域を直径 $30B$ の円形とし、O 型境界適合格子上 (128×64 点) で二次元数値流体解析を行う。基礎方程式は Navier-Stokes の式と圧力に関する Poisson 方程式であり、流速と圧力を同一点に配置するレギュラーメッシュ上で差分法により離散化した。時間積分には Euler の陽解法を用い、対流項は 3 次風上差分の K-K スキーム、その他の空間項は 2 次中心差分により近似した。強制加振を表現するために、格子を空間ではなく角柱に固定して格子全体を移動させ、境界条件として角柱表面に滑りなしの条件、遠方境界には強制加振による相対速度を与えた。解析におけるレイノルズ数は $Re=10^4$ とし、時間積分間隔 1.0×10^{-3} にして行った。

動的解析の初期条件として、十分に発達した静的解析結果を用いることとし、無次元時間 $tU/B=200$ まで平板を静止させた状態で静的解析を行い、その後強制加振を行う。空気力は各時間ステップにおいて平板上下面の圧力を積分することによって計算し、平板の強制変位に対する振幅と位相差から上述の非定常空気力係数を算出した。

4. 解析例

表-1 に示す諸元の平板について解析を行った。図-2 に非定常空気力係数のうち M_ϕ の理論値と計算値を比較している。計算結果はほぼ理論値と一致している。平板空気力の理論値を用いて複素固有値解析を行い、風速—減衰率曲線を図-3 に示した。今後、より広範囲の換算風速域の計算を進めるとともに、フラッター解析への適用性について検討したいと考えている。

表-1 平板の諸元

	たわみ振動	ねじれ振動
重量 (kgf/m)	5.0	
極慣性モーメント (kgf・m ² /m)		0.066
振動数(Hz)	2.17	4.19

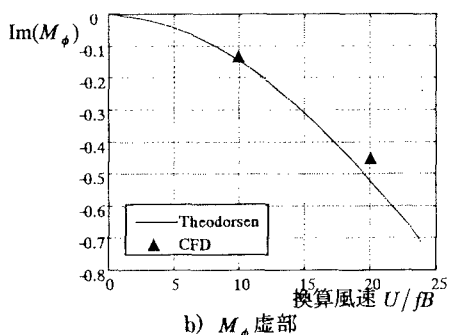
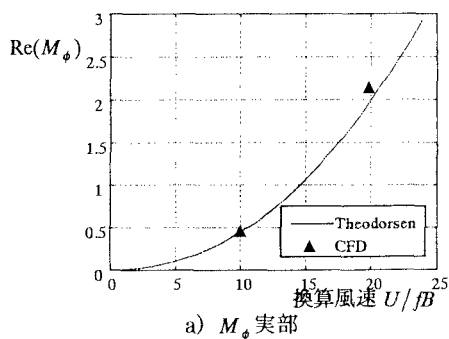


図-2 非定常空気力係数の比較

